

Modèle de Gassara dans la poursuite de la production pic d'une plaque solaire par régulation deux degrés de liberté

H. Djalo ^{1*} et P. Njampou ²

¹ Département de Physique, Faculté des Sciences
Université de Ngaoundéré, Ngaoundéré, Cameroun

² Département de Génie Electrique et Automatique
Ecole Nationale des Sciences Agro-Industriels, ENSAI
Université de Ngaoundéré, Ngaoundéré, Cameroun

(reçu le 15 février 2012 – accepté le 28 Décembre 2013)

Abstract - *This article focuses on optimizing the energy production of a solar panel, by controlling two degrees of freedom of its position relative to the movement of the sun. A mechatronic system driven by use of Gassara model was designed to address this issue. The study is based on the development of a mathematical model established to specify the path of the sun in the celestial vault. This model is then verified and validated through a few solar ephemeris have been calculated and compared to those from databases or approved and internationally recognized software tools. The model established involves inverse trigonometric functions and parameterized on time. This model is then verified and validated through a few solar ephemeris have been calculated and compared to those from databases or approved and internationally recognized software tools. Bringing the choice of the controller on a microcontroller with integrated real-time schedule, PICBasic 2000 PBM-R5 module. In order to overcome the insufficiency of this module does not recognize the inverse trigonometric functions, the model Gassara used in telecommunications for the approximation of these functions has been implemented successfully. The energy balance resulting validates the relevance of the model.*

Résumé - *Cet article porte sur l'optimisation de la production énergétique d'une plaque solaire, par régulation deux degrés de liberté de sa position par rapport au mouvement du soleil. Un système mécatronique piloté par utilisation du modèle de Gassara a été conçu afin de répondre à cet enjeu. L'étude repose sur le développement d'un modèle mathématique établi pour spécifier la trajectoire du soleil dans la voûte céleste. Ce modèle est ensuite vérifié et validé à travers quelques éphémérides solaires qui ont été calculées, puis comparées à celles issues des bases de données ou des outils logiciels homologués et mondialement reconnus. Le modèle ainsi établi fait intervenir les fonctions trigonométriques inverses et paramétrées sur le temps. Ce qui a porté le choix de l'organe de commande sur un microcontrôleur à calendrier temps réel intégré, le module PICBasic 2000 PBM-R5. Afin de pallier à l'insuffisance de ce module qui ne reconnaît pas les fonctions trigonométriques inverses, le modèle de Gassara utilisé en télécommunication pour l'approximation de ces fonctions a été transposé avec succès. Le bilan énergétique qui en découle valide la pertinence du modèle.*

Mots clés: Modèle de Gassara - Suiveur solaire - Actionneur de positionnement - Ephémérides solaires - Gain énergétique.

1. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables représentent un enjeu de plus en plus croissant, face au contexte actuel portant sur la lutte contre les changements climatiques et l'épuisement

* haman_djalo@yahoo.com

programmé des ressources énergétiques fossiles. De toutes ces énergies, celles résultant du rayonnement solaire procurent en particulier une opportunité véritable pour le continent africain qui dispose d'un fort potentiel, malheureusement très peu exploité. En effet, l'énergie solaire qu'elle soit photovoltaïque ou thermique est non polluante et offre une alternative indéniable à la résorption du déficit énergétique.

Dans la thématique que nous abordons à savoir, l'optimisation de la production d'énergie par les plaques photovoltaïques, il convient de les positionner de façon à capter le maximum de rayonnement solaire. Parmi les solutions proposées dans la littérature, celles qui consistent en le suivi du soleil durant sa course ou systèmes de poursuite, permettent d'augmenter le gain énergétique d'environ 20-50 % pour les suiveurs à deux axes. Les innovations technologiques opérées dans le secteur des actionneurs d'automatisme et l'avènement des panneaux solaires flexibles, voire la 'peinture solaire' [1, 2] viennent renforcer et conforter la recherche dans ce domaine.

Plusieurs articles issus de la littérature ont porté leur intérêt sur la commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes, (3, 4, 5, 8; 9, 11, 12, 13°). Il en ressort une multitude de méthodes et de techniques regroupées en deux grandes familles.

La première famille est celle des automatismes où les systèmes de poursuite utilisent les détecteurs optoélectroniques pour repérer la position du soleil et ensuite enclencher si nécessaire le mouvement de suivi de la plaque. Son inconvénient majeur se situe au niveau des pertes supplémentaires d'énergie dues à la consommation du système de commande qui reste actif en permanence. Elle peut également être perturbée par l'effet de masque.

La deuxième famille est celle des automatismes à calculs prévisionnels de la trajectoire du soleil afin d'enclencher ou non le système de poursuite, par comparaison à la trajectoire réelle. On parle alors des suiveurs programmés ou des suiveurs régulés ou encore de la 'poursuite astronomique calculée' par opposition aux suiveurs à détecteurs cités plus haut. Cette catégorie n'a pas besoin d'énergie supplémentaire nécessaire aux suiveurs à détecteurs. Par contre, elle exige beaucoup de précision dans le calage des axes du repère de positionnement, d'où le modèle de Gassara. C'est un modèle non seulement plus précis, mais qui répond aux contraintes des microcontrôleurs en général.

Notre contribution appartient donc à la deuxième famille. Sa partie opérative est mue grâce à deux moteurs, tandis que sa partie commande utilise le microcontrôleur PICBasic 2000 PBM-R5, programmé en utilisant le modèle de Gassara, pour le pilotage des actionneurs afin de suivre avec précision la trajectoire de référence.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Matériels

Il est prouvé dans la littérature [14] que les plaques (A) et (B) de la figure 1 captent le même rayonnement solaire, bien que la plaque (B) soit plus petite que la plaque (A).

L'observation ci-dessus met en évidence l'importance de l'inclinaison dans l'efficacité de captage d'une plaque solaire. Il est décrit par un paramètre (R) [14] connu sous le nom de '*rendement de position d'une plaque solaire*'. Ce paramètre (R) exprime la puissance captée par la plaque (A) pour une position donnée en fonction des faisceaux lumineux, par rapport à la puissance maximale qu'elle pourrait capter dans les

mêmes conditions de rayonnement. Il se traduit mathématiquement par l'équation (1) où θ désigne l'angle d'attaque ou l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

$$R(\%) = \cos \theta \times 100 \tag{1}$$

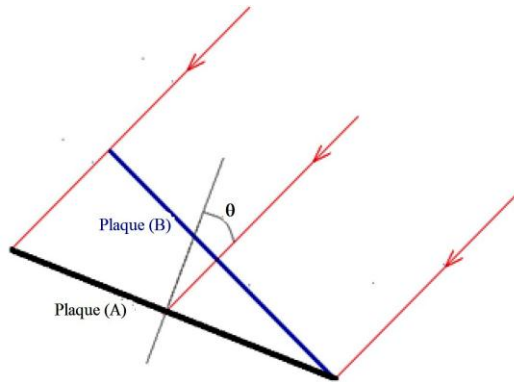


Fig. 1: Mise en évidence de l'influence de l'inclinaison sur l'efficacité du captage solaire

Dès lors, l'on comprend que la situation idéale, en terme de rendement de positionnement correspond à $\theta = 0$. Or la rotation de la terre autour de son axe, responsable du cycle jour-nuit, se traduit par un déplacement continu du soleil dans son mouvement apparent. De ce fait, la plaque doit aussi être en mouvement de façon à assurer en permanence la condition $\theta = 0$ pour corriger les pertes liées au trajet optique des rayons solaires.

Pour atteindre le pic de la production à tout instant, le système doit de façon autonome, assurer son orientation et son inclinaison en effectuant deux mouvements découplés dont l'un suivant un axe horizontal et l'autre suivant un axe vertical. Dans notre application, nous avons mobilisé le matériel dont la liste est donnée dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Matériel utilisé

Qté	Désignation	Caractéristiques	Puissance totale
1	Panneau solaire PV de Marque NP50G de NAPS-SA	21,6 V; 3,35 A; 75 W	75 W
1	Module PICBasic PBM-R5	0.25 W	0.25 W
1	Régulateur de tension 7805	0.75 W	0.75 W
1	Afficheur (Module ELCD)	0.25 W	0.25 W
6	Résistances de 10 K pour clavier matriciel 16 touches	0.25 W	1.5 W
2	Interrupteurs de position		0
2	Circuits de commutation ULN 2003	0.6 W	1.2 W
2	Moteurs pas à pas hybride ZSS 25 de Phytron et mécanisme d'entraînement	3.6 W (12 V; 0.6 A/phase)	14.4 W

2.2 Microcontrôleur et électronique de commande

Les coordonnées solaires (h) et (a) et par conséquent (θ_z) sont fonctions du temps légal (TL) et du jour julien (j). Pour les calculer, notre choix a porté sur le module PIC-Basic PBM-R5 qui a non seulement l'avantage d'intégrer un calendrier temps réel, mais en plus, son jeu d'instruction intègre les fonctions trigonométriques directes [15], contrairement aux microcontrôleurs "PIC" classiques de Microchip.

Cependant, bien qu'assez riche, son jeu d'instruction ne reconnaît pas les fonctions trigonométriques inverses.

Une solution empruntée de la revue de la littérature en télécommunication nous a conduits au choix du modèle de Gassara *et al.* [16] (fonction $f_2(x)$), comparativement au modèle polynomial classique issu du développement limité (fonction ($f_1(x)$)):

$$(a) \sin^{-1}(x) = x + \frac{x^3}{2 \times 3} + \frac{1 \times 3 \times x^5}{2 \times 4 \times 5} + \dots + \frac{1 \times 3 \times 5 \times \dots \times (2n-1)x^{2n+1}}{2 \times 4 \times 6 \times \dots \times (2n)(2n+1)} + 0(x^{2n+2}) = f_1(x) \quad (2)$$

$$(b) \sin^{-1}(x) = 1.4(\sqrt{1+x} - \sqrt{1-x} - 0.4x - 0.01x^3) = f_2(x) \quad (3)$$

Et partant de $\sin^{-1}(x) + \cos^{-1}(x) = \pi/2$, on obtient indifféremment:

$$(a') \cos^{-1}(x) = \frac{\pi}{2} - x - \frac{x^3}{2 \times 3} - \frac{1 \times 3 \times x^5}{2 \times 4 \times 5} + \dots + \frac{1 \times 3 \times 5 \times \dots \times (2n-1)x^{2n+1}}{2 \times 4 \times 6 \times \dots \times (2n)(2n+1)} - 0(x^{2n+2}) \quad (4)$$

$$(b') \cos^{-1}(x) = \frac{\pi}{2} - 1.4(\sqrt{1-x} - \sqrt{1+x} + 0.4x + 0.01x^3) \quad (5)$$

Le modèle de Gassara a été retenu après évaluation de l'erreur de chacun des modèles relativement à la fonction \sin^{-1} . Cette erreur est calculée à partir des angles trigonométriques remarquables de l'intervalle $[-\pi/2, \pi/2]$ et, grâce à la fonction:

$$e_{ri} = \frac{\sin^{-1}(x) - f_i(x)}{\sin^{-1}(x)} \quad \text{avec } i \in \{1, 2\} \quad (6)$$

2.3 Méthode

La méthodologie vise la modélisation mathématique de la trajectoire du soleil. La plaque solaire, repérée par l'inclinaison (β_p) et l'angle surfacique azimutal (α_p), telles que indiquées sur la figure 2, est initialisée grâce à deux interrupteurs de position.

Duffie *et al.* [17], établissent que le rayon solaire direct incident (θ) reçu par la plaque est lié aux autres angles de la figure 2 par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \sin(\delta) \times \cos(L) \times \cos(\beta_p) - \sin(\delta) \times \cos(L) \times \sin(\beta_p) \times \cos(\alpha_p) + \\ &\cos(\delta) \times \cos(L) \times \cos(\beta_p) \times \cos(\omega) + \cos(\delta) \times \sin(L) \times \sin(\beta_p) \times \cos(\alpha_p) \times \cos(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Et } \cos(\theta) = \cos(\theta_z) \times \cos(\beta_p) + \sin(\theta_z) \times \sin(\beta_p) \times \cos(a - \alpha_p) \quad (8)$$

δ , L , et ω représentent respectivement la déclinaison, la latitude du lieu et l'angle horaire. Les autres angles sont indiqués directement sur la même figure 2.

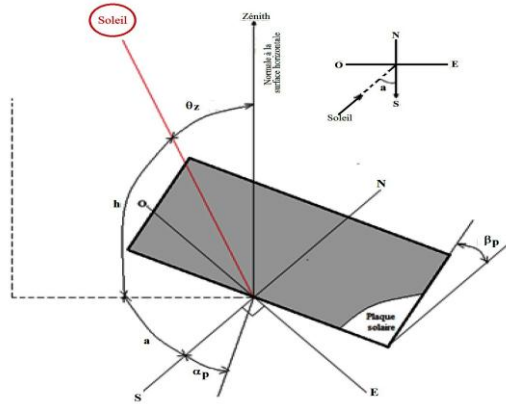


Fig. 2: Indication des angles solaires sur une surface inclinée

La production pic d'une telle plaque est atteinte lorsque le rayonnement solaire direct lui parvient perpendiculairement à tout instant ($\cos(\theta) = 1$). Pour qu'il en soit ainsi, il faut:

$$\begin{cases} \beta_p = \theta_z \\ \alpha_p = a \end{cases} \quad (9)$$

2.4 Modélisation mathématique de la trajectoire du soleil dans son mouvement apparent

La définition de la trajectoire revient à la modélisation des coordonnées solaires (h) et (a) en fonction du temps solaire et par la suite, en fonction du temps légal de la localité. Les équations (10), (11) et (12) ci-dessous, issues de la résolution du triangle sphérique et connues sous le nom d'équations de Gauss, permettent de repérer le soleil à tout instant par sa hauteur (h) et son azimut (a) en un lieu quelconque du globe terrestre de latitude (L) et pour un jour de rang (j):

$$\sin(h) = \sin(L) \times \sin(\delta) + \cos(L) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (10)$$

$$\cos(h) \times \sin(a) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad (11)$$

$$\cos(h) \times \cos(a) = -\sin(\delta) \times \cos(L) + \cos(\delta) \times \sin(L) \times \cos(\omega) \quad (12)$$

En définitive, moyennant quelques petites précautions, on obtient (h) et (a) par les relations trigonométriques inverses suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} h = \sin^{-1}(h) \\ \text{si } \cos(\omega) \geq \frac{\tan(\delta)}{\tan(L)} \text{ alors } a = \sin^{-1}(a) \\ \text{si } \cos(\omega) < \frac{\tan(\delta)}{\tan(L)} \text{ alors } a = 180 - \sin^{-1}(a) \end{array} \right. \quad (13)$$

ou

$$\left\{ \begin{array}{l} h = \sin^{-1}(h) \\ \text{si } \sin(\omega) > 0 \text{ alors } a = \cos^{-1}(a) \\ \text{si } \sin(\omega) \leq 0 \text{ alors } a = 360 - \cos^{-1}(a) \end{array} \right. \quad (14)$$

Ces résultats procèdent:

- De la Formule de Cooper [18] qui spécifie δ par:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365} \times (j + 284)\right) \quad (15)$$

où j est le rang du jour ($j = 1$ pour le 1^{er} janvier, $j = 32$ pour le 1^{er} février...).

- De la relation ci-dessous déterminant l'angle horaire (ω) où (TS) est l'heure solaire:

$$\omega = 15 (TS - 12) \quad (16)$$

$$\text{Or } TS = TL - C + ET + 4 \times (l_{\text{ref}} - 1) \quad (17)$$

avec (TL), le temps légal et (C), la différence entre l'heure légale (TL) et l'heure civile du fuseau horaire du lieu considéré (TCF):

$$C = TL - TCF \quad (18)$$

($l_{\text{ref}} - 1$) est la différence de longitude entre le lieu considéré et le servant de référence au temps légal (en général, c'est le fuseau horaire).

(ET) est l'équation du temps (en minutes). Kennewell *et al.* recommandent la relation suivante, [19]:

$$ET = 9.87 \sin(2\beta) - 7.67 \sin(\beta + 78.7) \quad \text{avec } \beta = 360/365 \times (j - 81) \quad (19)$$

Ainsi, pour une localité, L , l , l_{ref} sont connues. Pour un jour j de l'année et pour une heure légale TL , il est désormais possible de calculer ET , TS , ω , δ et par conséquent $\sin(h)$, $\cos(h)$, $\sin(a)$ et $\cos(a)$.

2.5 Représentation du lever et du coucher du soleil en fonction du temps légal

Dans un repère local, le soleil au levé ou au couché dans l'horizon, est sur le même plan horizontal que l'observateur du lieu d'étude. En traduisant cette remarque par $h = 0$ dans l'équation (3), on obtient la valeur de l'angle horaire au levé du soleil de la manière suivante:

$$h = 0 \Rightarrow \sin(h) \quad \text{et} \quad \cos(\omega_1) \times \cos(L) \times \cos(\delta) + \sin(L) \times \sin(\delta) = 0$$

$$\text{D'où } \cos(\omega_1) = \frac{-\sin(L) \times \sin(\delta)}{\cos(L) \times \cos(\delta)} \Leftrightarrow \cos(\omega_1) = -\tan(L) \times \tan(\delta)$$

$$\text{et } \omega_1 = \cos^{-1}(-\tan(L) \times \tan(\delta)) = -\omega_c \quad (20)$$

En reportant la valeur de ' ω_1 ' dans l'équation (16), on obtient la valeur de l'heure solaire au levé et au couché du soleil. Enfin, ce temps est traduit en temps légal à partir de l'équation (17):

$$(TL)_1 = 12 - \frac{\cos^{-1}(-\tan(L) \times \tan(\delta))}{15} - ET - 4(I_{ref} - 1) \quad (21)$$

$$(TL)_c = 12 - \frac{\cos^{-1}(-\tan(L) \times \tan(\delta))}{15} - ET - 4(I_{ref} - 1) \quad (22)$$

Dès lors, l'on peut calculer la durée (d_j) du jour par la relation:

$$d_j = (TL)_c - (TL)_1 = \frac{2}{15} \times \cos^{-1}(-\tan(L) \times \tan(\delta)) \quad (23)$$

2.6 Le bilan énergétique du système

Du point de vue énergétique, ce bilan est important en ceci qu'il permet de s'assurer que le gain énergétique engrangé ne suffit pas seulement à pourvoir à la dépense d'énergie utilisée pour faire pivoter le panneau solaire. A ce titre, Alexandru *et al.* montrent dans [6, 7] qu'un système de poursuite est performant si:

$$\varepsilon = E_T - E_F - E_C \gg 0 \quad (24)$$

E_T , est l'énergie produite par le panneau avec le système de poursuite, E_F , l'énergie produite par le même panneau sans système de poursuite, E_C , l'énergie consommée par le système de poursuite, et ε est le paramètre d'efficacité du système de poursuite, tous exprimés en unité d'énergie.

Dans le cadre de ce papier, les paramètres E_F , et E_C , seront déterminés par calcul grâce aux données énergétiques fournies par les fabricants des différents organes électromécaniques. Le paramètre E_T , quant à lui sera tiré de la relation du gain g exprimé selon Sabir Rustemli *et al.*, 2010 [20] comme suit:

$$g = 100 \times (1 - E_F / E_T) \quad (25)$$

En définitive, une relation est ainsi établie, permettant d'exprimer ε en fonction de g et donne ainsi la possibilité de prédire de l'efficacité du système de poursuite en fonction du gain énergétique engrangé.

3. RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

3.1 Vérification du modèle mathématique établi pour la trajectoire du soleil

Le mode de définition de l'heure légale (TL) étant propre au pouvoir public de chaque pays, le modèle mathématique utilisé pour représenter la trajectoire du soleil en fonction du temps légal n'est donc pas un modèle universel. Pourtant ce modèle constitue une donnée basique. Il importe alors de vérifier les résultats issus de ce modèle en déterminant la valeur de quelques éphémérides et en les comparant à ceux fournis par des logiciels et des bases de données homologuées.

Ainsi, le temps légal du levé, le temps légal du couché d'une part (TL_1 , TL_c), la hauteur et l'azimut (h, a) du soleil d'autre part ont été évalués pour la ville de

Ngaoundéré au Cameroun ($C = 0$) à 12 heures (heure légale) en date du 21 Mars, du 23 Juin, du 22 Septembre et du 21 Décembre des années 2010, 2011 et 2012. Les comparaisons faites avec les résultats proposés par SunEarth, ptaff (bases de données en ligne), Shadow 3.4, et Retscreen 4 sont indiqués dans le **Tableau 2** ci-dessous. Toute la pertinence du modèle de Gassara se retrouve répertoriée dans le **Tableau 3**.

Tableau 2: Calculs des éphémérides et vérification du modèle mathématique de la trajectoire solaire

Lieu	L = 7.317				l = 13.583				$I_{ref} = 15.05$				TL = 12											
Année	2010								2011								2012							
jours	21/3	23/6	22/9	21/12	21/3	23/6	22/9	21/12	21/3	23/6	22/9	21/12	21/3	23/6	22/9	21/12								
j	80,0000	174,0000	265,0000	355,0000	80,0000	174,0000	265,0000	355,0000	81,0000	175,0000	266,0000	356,0000	81,0000	175,0000	266,0000	356,0000								
$\delta(^{\circ})$	-0,4037	23,4394	-0,6054	-23,4498	-0,4037	23,4394	-0,6054	-23,4498	0,0000	23,4237	-1,0089	-23,4446	0,0000	23,4237	-1,0089	-23,4446								
β	-0,9863	91,7260	181,4795	270,2466	-0,9863	91,7260	181,4795	270,2466	0,0000	92,7123	182,4658	271,2329	0,0000	92,7123	182,4658	271,2329								
ET(min)	-7,8341	-1,8700	8,0671	1,3856	-7,8341	-1,8700	8,0671	1,3856	-7,5213	-2,0784	8,4275	0,9161	-7,5213	-2,0784	8,4275	0,9161								
TS(h)	11,9672	12,0666	12,2323	12,1209	11,9672	12,0666	12,2323	12,1209	11,9724	12,0632	12,2383	12,1131	11,9724	12,0632	12,2383	12,1131								
$\omega(^{\circ})$	-0,4915	0,9995	3,4838	1,8134	-0,4915	0,9995	3,4838	1,8134	-0,4133	0,9474	3,5739	1,6960	-0,4133	0,9474	3,5739	1,6960								
sin(h)	0,9909	0,9605	0,9886	0,8588	0,9909	0,9605	0,9886	0,8588	0,9918	0,9606	0,9875	0,8589	0,9918	0,9606	0,9875	0,8589								
sin(a)	-0,0637	0,0575	0,4040	0,0567	-0,0637	0,0575	0,4040	0,0567	-0,0566	0,0546	0,3959	0,0530	-0,0566	0,0546	0,3959	0,0530								
$h(^{\circ})$	82,2638	73,8491	81,3489	59,1822	82,2638	73,8491	81,3489	59,1822	82,6714	73,8676	80,9429	59,1938	82,6714	73,8676	80,9429	59,1938								
$\cos(\omega) \cdot \tan(\delta) / \tan(L)$	1,0548	-2,3766	1,0804	4,3777	1,0548	-2,3766	1,0804	4,3777	1,0000	-2,3741	1,1352	4,3769	1,0000	-2,3741	1,1352	4,3769								
$\alpha(^{\circ})$	-3,6537	176,7017	23,8261	3,2485	-3,6537	176,7017	23,8261	3,2485	-3,2420	176,8699	23,3235	3,0393	-3,2420	176,8699	23,3235	3,0393								
TL ₁	6,0362	5,7206	5,7729	6,0920	6,0362	5,7206	5,7729	6,0920	6,0276	5,7242	5,7704	6,0997	6,0276	5,7242	5,7704	6,0997								
TL _c	18,0293	18,1461	17,7626	17,6662	18,0293	18,1461	17,7626	17,6662	18,0276	18,1494	17,7531	17,6741	18,0276	18,1494	17,7531	17,6741								
TL _g (hh:mm:ss)	6:02:10	5:43:14	5:46:23	6:05:31	6:02:10	5:43:14	5:46:23	6:05:31	6:01:39	5:43:27	5:46:13	6:05:59	6:01:39	5:43:27	5:46:13	6:05:59								
TL _h (hh:mm:ss)	18:01:46	18:08:46	17:45:45	17:39:58	18:01:46	18:08:46	17:45:45	17:39:58	18:01:39	18:08:58	17:45:11	17:40:27	18:01:39	18:08:58	17:45:11	17:40:27								
d ₁	11:59:36	12:25:32	11:59:22	11:34:27	11:59:36	12:25:32	11:59:22	11:34:27	12:00:00	12:25:31	11:58:58	11:34:28	12:00:00	12:25:31	11:58:58	11:34:28								
TL _g (hh:mm:ss)	06:09	05:51	05:55	06:13	06:09	05:51	05:55	06:13	06:09	05:51	05:55	06:13	06:09	05:51	05:55	06:13								
TL _h (hh:mm:ss)	18:16	18:24	18:02	17:55	18:16	18:24	18:02	17:55	18:16	18:24	18:02	17:55	18:16	18:24	18:02	17:55								
d ₁	12:07	12:33	12:07	11:42	12:07	12:33	12:07	11:42	12:07	12:33	12:07	11:42	12:07	12:33	12:07	11:42								
TL _g (hh:mm:ss)	06:09:30	05:51:23	05:54:59	06:12:40	06:09:38	05:51:20	05:55:01	06:12:33	06:09:15	05:51:30	05:54:54	06:12:56	06:09:15	05:51:30	05:54:54	06:12:56								
TL _h (hh:mm:ss)	18:16:24	18:24:22	18:01:48	17:54:44	18:16:31	18:24:19	18:01:56	17:54:37	18:16:21	18:24:28	18:01:31	17:54:59	18:16:21	18:24:28	18:01:31	17:54:59								
d ₁	12:06:54	12:32:59	12:06:49	11:42:04	12:06:53	12:32:59	12:06:55	11:42:04	12:07:06	12:32:58	12:06:37	11:42:03	12:07:06	12:32:58	12:06:37	11:42:03								
TL _g (hh:mm:ss)	06:08:08	05:50:13	05:55:55	06:10:51	06:07:59	05:50:14	05:55:51	06:10:43	06:10:05	05:49:28	05:52:50	06:12:55	06:10:05	05:49:28	05:52:50	06:12:55								
TL _h (hh:mm:ss)	18:15:25	18:23:20	18:01:53	17:53:45	18:15:21	18:22:57	18:02:24	17:52:58	18:17:10	18:21:22	18:01:11	17:54:53	18:17:10	18:21:22	18:01:11	17:54:53								
d ₁	12:07:17	12:33:07	12:05:58	11:42:54	12:07:22	12:32:43	12:06:33	11:42:15	12:07:05	12:31:54	12:08:21	11:41:58	12:07:05	12:31:54	12:08:21	11:41:58								
	Résultats issus du modèle mathématique établi								Résultats fournis par ptaff															
	Résultats fournis par Sunearth								Résultats fournis par Retscreen															

3.2 Calcul de la performance énergétique du système en fonction du gain g

• Calcul de E_C

$$\varepsilon = (E_T - E_F) - E_C$$

E_C est obtenu à partir du théorème de Boucherot après avoir relevé les puissances consommées sur les fiches techniques des différents composants (**Tableau 1**).

• Calcul de E_F

L'énergie fournie par heure par le panneau solaire vaut 75 Wh.

• Calcul de E_T

De l'équation (25), on obtient littéralement $E_T = (100 \times E_F) / (100 - g)$, soit $E_T = (7500) / (100 - g)$.

En substituant ces diverses valeurs dans l'expression (24), on a:

$$\varepsilon(g) = \left(\frac{7500}{100 - g} - 75 \right) - 32.75$$

$$\text{Soit, } \varepsilon(g) = \frac{107.75g - 3275}{-g + 100}$$

Dès lors, l'on peut esquisser la représentation de cette fonction homographique dans l'intervalle $]0, 100[$ afin d'apprécier l'efficacité du système de poursuite en fonction du gain énergétique.

4. DISCUSSION DES RESULTATS

Le modèle de Gassara a été préféré au modèle polynomial issu du développement limité. En effet l'on observe bien que les résultats fournis par ce modèle ($f_2(x)$) sont identiques à ceux issus de la fonction originale à 10^{-2} près dans l'intervalle d'analyse, contrairement aux résultats obtenus du développement limité ($f_1(x)$) ré de nombreuses itérations.

De même, l'erreur relative de ce modèle ($e_{r2}(x)$) dans l'intervalle d'analyse est nulle contrairement à l'erreur relative ($e_{r1}(x)$) du modèle polynomial qui s'écarte de plus en plus de l'axe des abscisses. Par ailleurs, le nombre d'opérateurs utilisés par le modèle de Gassara est de loin inférieur à ceux utilisés par le modèle polynomial ce qui procure non seulement un gain de temps ou de vitesse de calcul au microcontrôleur mais aussi un gain d'espace dans sa mémoire RAM déjà limitée.

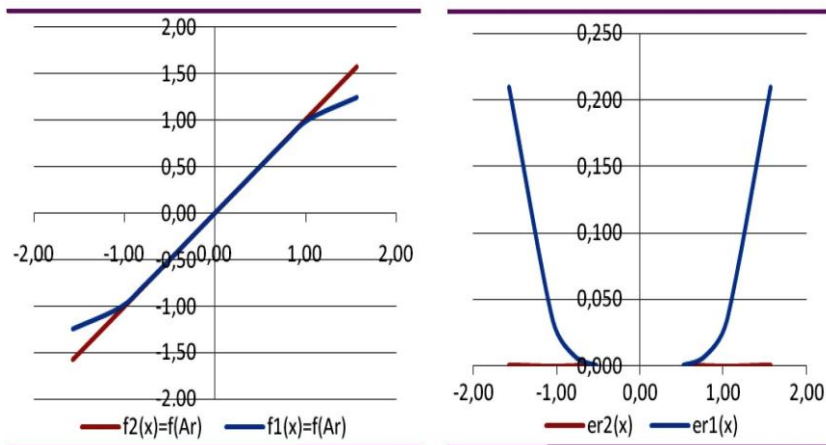


Fig. 3: Evaluation des erreurs et des incertitudes relatives dues aux modèles d'approximation de la fonction \sin^{-1}

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle mathématique utilisé pour décrire la trajectoire du soleil dans son mouvement apparent a été vérifié et validé grâce aux outils logiciels libres. Ce modèle augure des perspectives dans les calculs des éphémérides utilisés dans les applications solaires.

Le modèle mathématique proposé par Gassara pour approximer les fonctions trigonométriques dans les applications de télécommunication est ainsi validé dans notre système de poursuite. Ce modèle pourra désormais être utilisé dans le même but avec la plupart des microcontrôleurs et en particulier avec les PIC pour lesquelles les fonctions trigonométriques directes et inverses restent inconnues.

Tableau 3: Incertitudes relatives des deux modèles d'approximation de la fonction \sin^{-1}

Angle, (degré (Ad))	-90	-60	-45	-30	0	30	45	60	90
Angle, (radian (Ar))	-1.57	-1.05	-0.79	-0.52	0	0.52	0.79	1.05	1.57
Sin (Ad) = x	-1.00	-0.87	-0.71	-0.50	0	0.50	0.71	0.87	1.00
$f_1(x)$	-1.24	-1.01	-0.78	-0.52	0	0.52	0.78	1.01	1.24
$f_2(x)$	-1.57	-1.05	-0.79	-0.52	0	0.52	0.79	1.05	1.57
$e_{r1}(x)$	0.21	0.035	0.008	0.001		0.001	0.008	0.035	0.210
$e_{r2}(x)$	0.001	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.001

Les résultats issus de l'implémentation montrent que la stratégie de poursuite envisagée se prête bien au fonctionnement sans capteurs optoélectroniques, ce qui confirme la réduction d'énergie consommée. Sur ce plan énergétique, l'analyse prévisionnelle menée permet de trancher sur la performance du système de poursuite en conformité avec sa partie mécanique. Elle prévoit selon la théorie de Alexandru que ce système n'est performant que pour des gains énergétiques supérieurs à 30 %; ce qui reste conforme aux propositions tirées de la littérature (**Tableau 4**).

Tableau 4: Fonction de performance énergétique

g	0	10	20	30	3.4	40	50
$\varepsilon(g)$	-32.75	-24.41667	-14	-0.60714	0.00862	17.25	42.25

REFERENCES

- [1] W. Liang and Z. Wang, 'Several Experiences on Automatic Sun Tracking System, Solar Thermal Systems and Applications', Proceedings of ISES Solar World Congress: Solar Energy and Human Settlement: pp. 1768 – 1772, 2007.
- [2] Document Scientifique, CEA, 'Questions de Physique autour de l'Energie Solaire', DCOM, Service Information Média, 2012.
- [3] B. Barkat, B. Azoui, K. Chara, A. Bouali, M.R. Achour et K. Achi, 'Expérimentation du Système de Poursuite Solaire « Auresolar »: Identification Energétique et Tests de Pompe', ENERSOL'01, Adrar.
- [4] B. Barkat, B. Azoui, K. Chara, M. Djarallah and C. Hamouda, 'Experimentation of Sun Tracking System « Auresolar »: Energetically Identification in Pumping System Application', WREC 2002 Cologne, Germany, 29 June – 07 July, 2002.
- [5] C. Alexandru, 'Aspects Regarding the Mechatronic Tracking Systems Used for Improving the Photovoltaic Conversion', Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008.
- [6] C. Alexandru, M. Comsit and P. Alexandru, 'Dynamic Optimisation of A 2-DOF Pseudo-Equatorial Tracking System in Virtual Prototyping Concept', University Transilvania of Braşov (Romania), 2007.

- [7] C. Alexandru and C. Pozna, 'The Optimization of the Tracking Mechanism Used for a Group of PV Panels', International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ'09, Valencia, Spain, 15th to 17th april, 2009.
- [8] J.M.G. Figueiredo and J.M.G. Sá da Costa, 'Intelligent Sun-Tracking System for Efficiency Maximization of Photovoltaic Energy Production', CEM-IDMEC, Universidade Évora, Portugal.
- [9] O. Bingöl, A. Altintas and Y. Öner, 'Microcontroller Based Solar-Tracking System and Its Implementation', Journal of Engineering Sciences, Vol. 12 N°2, pp. 243 – 248, 2006.
- [10] R. Rezoug and A. Zaatri, 'Optimisation du Rendement d'un Système Photovoltaïque par Poursuite du Soleil', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12 N°2, pp. 299 – 306, 2009.
- [11] R. Mamlook, S. Nijmeh and S.M. Abdallah, 'A Programmable Logic Controller to Control Two Axis Sun Tracking System', Information Technology Journal, Vol. 5, N°6, pp. 1083 – 1087, 2006.
- [12] S. Abdallah and O. Badran, 'Sun Tracking System for Productivity Enhancement of Solar Still', Conference on Desalination and Environment; Greece, April 22 – 25 2007, and Desalination, Vol. 200, N°1-3, pp. 669 – 676, 2008.
- [13] T. Bendib, B. Barkat, F. Djeflal, N. Hamia and A. Nidhal, 'Commande Automatique d'un Système de Poursuite Solaire à Deux Axes à Base d'un Microcontrôleur PIC16F84A', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 523 – 532, 2008.
- [14] Y. Leroy, 'Optimisation de l'Orientation des Panneaux Solaires', 2010.
- [15] I. Guy, 'S'initier à la Programmation des PICBASIC', ETSF- Dunod, Paris, 2005.
- [16] B. Gassara, M. Abdellaoui et N. Masmoudi, 'Nouveau Modèle de la Fonction Trigonométrique Arcsinus(x) utilisé en PLL ISPD', 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of information and telecommunications, Tunisie, 2005.
- [17] J. Duffie and W. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 2nd Ed., J. Wiley and Sons, 1991.
- [18] V. Bourdin, 'Calculs Astronomiques Simplifiés', Université Paris-Sud Orsay, Master 2^{ème} Année – Module énergie renouvelable – Energie solaire thermique, 2008.
- [19] J. Kennewell and A. McDonald, 'The Equation of Time', Australian Government, IPS - Radio and Space Services.
- [20] S. Rustemli, F. Dincadam and M. Demirtas, 'Performance Comparison of the Sun Tracking System and Fixed System in the Application of Heating and Lighting', The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 35, N°2B, pp. 171 – 184, 2010.